

©1995 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТЫ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В *p*-ГЕРМАНИИ В ПРОДОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В.Г.Белья, А.Т.Далакян, В.Н.Тулупенко, В.А.Фирсов

Донбасская государственная машиностроительная академия,
343916, Краматорск, Украина
(Получена 26 октября 1994 г. Принята к печати 16 декабря 1994 г.)

Сообщаются результаты измерений вольт-амперных характеристик, зависимости силы тока и интенсивности излучения дальнего инфракрасного диапазона как функции одноосного давления в дырочном германии. Измерения проводились на образцах с концентрацией примесей от 10^{13} до 10^{15} см^{-3} , вырезанных вдоль направлений [111] и [100], при температурах 4.2 и 77 К.

Введение

В работе [1] сообщалось о наблюдении стимулированного излучения в дальней инфракрасной (ИК) области спектра из однооснодеформированного *p*-германия. Эта работа поставила ряд вопросов о механизме наблюдаемых эффектов, на которые авторы работы [2], используя моделирование поведения дырок методом Монте-Карло, не нашли удовлетворительного ответа. И главный вопрос — механизм возникновения инверсии — пока еще остается открытым.

В нашей работе сообщаются результаты экспериментов по изучению влияния концентрации носителей заряда, температуры и направления одноосного давления относительно кристаллографических осей кристалла на эффекты, описанные в [1], в сильных электрических полях.

Эксперимент

В работе исследовались образцы Ge <Ga> ($0.8 \times 0.8 \times 10$ мм³) с различной концентрацией примесей (от 10^{13} до 10^{15} см^{-3}), вырезанные вдоль направлений [111] и [100], в условиях одноосного сжатия кристалла. Одноосное давление P (до 18 кбар) прикладывалось вдоль большей стороны образца. Методика приготовления образцов и система их нагружения подобны описанным в [1]. Импульсы сильного

электрического поля E (до 4.5 кВ/см) длительностью 0.4 мкс прикладывались в направлении одноосного давления. Измерения проводились в режиме разового импульса. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) деформированных образцов, зависимости силы тока и интенсивности дальнего ИК излучения как функции давления, а также проводились зондовые измерения степени однородности электрического поля по длине образца. Излучение регистрировалось фотоприемниками Ge(Ga) и Ge(Zn) с областями спектральной чувствительности $80 \div 120$ и $10 \div 45$ мкм соответственно. Рабочие температуры — 4.2 и 77 К.

Результаты экспериментов

На рис. 1 показаны ВАХ деформированного вдоль направления [100] p -Ge, измеренные при $T = 4.2$ К. При малых приложенных напряжениях U ($E = U/d \leq 200$ В/см, здесь d — длина образца) в деформированных образцах наблюдается более резкое по сравнению со случаем $P = 0$ нарастание тока j как функции напряжения. При больших напряжениях одноосная деформация приводит к появлению на ВАХ участка насыщения тока, характерного для систем с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), к которому относятся одноосно-деформированный германий [3]. Насыщение тока как функции приложенного напряжения связано с неоднородным распределением напряженности электрического поля по длине образца. Как показано в [4], образцы из материалов, обладающих ОДП, являются неустойчивыми по отношению к образованию статистических неоднород-

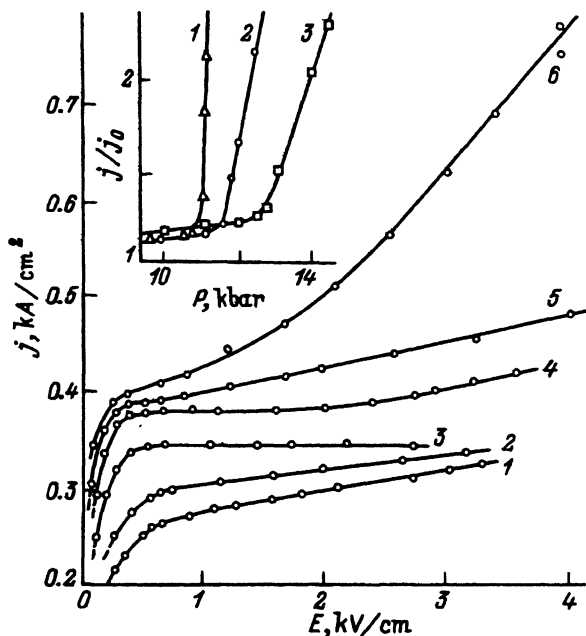


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики деформированного германия при различных давлениях P , кбар: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 6, 4 — 8, 5 — 9, 6 — 10. $T = 4.2$ К. $E \parallel P \parallel [100]$. На вставке — зависимости относительного изменения тока j/j_0 от давления при различных напряженностях электрического поля E кВ/см: 1 — 4.3, 2 — 3.9, 3 — 3.3.

ных распределений плотности заряда и напряженности электрического поля. Локальные затравочные неоднородности электрического поля, обусловленные наличием контактов, неоднородностью распределения легирующей примеси, дефектами и т.д., могут разрастаться до макроскопически заметных размеров, образуя статический домен сильного поля — область с пониженной концентрацией носителей заряда, обладающую вследствие этого большим сопротивлением. Возникновение и эволюция статического домена в одноосно-деформированном *p*-германии при гелиевых температурах описаны в [5]. В образце со статическим доменом изменение напряжения, приложенного к образцу, приводит к изменению размеров домена, а не тока, и поэтому ВАХ не имеет *N*-образного вида, а наблюдается насыщение тока. Дальнейший рост тока будет наблюдаться только после прохождения интервала полей, в котором реализуется ОДП. Диапазон полей, в котором наблюдается насыщение тока, уменьшается при увеличении давления.

Описанный ход ВАХ объясняет «пороговый» характер роста тока при увеличении давления при постоянном приложенном к образцу напряжении. Следуя работе [1], пороговым будем называть давление, при котором начинается резкое увеличение тока. Развертке тока по давлению в постоянном электрическом поле соответствует переход от одной характеристики к другой на семействе ВАХ, измеренных при различных давлениях. Резкому росту тока при увеличении давления соответствует переход к характеристикам с ярко выраженной второй восходящей ветвью тока. Действительно, из рис. 1 видно, что при переходе от кривой 4 (8 кбар) к кривой 5 (9 кбар), отношение $\Delta j/\Delta P$ в поле $E = 3$ кВ/см составляет $40 \text{ А/см}^2 \cdot \text{кбар}$, а при переходе от кривой 5 к кривой 6 (10 кбар) это отношение уже будет $150 \text{ А/см}^2 \cdot \text{кбар}$. Из вида ВАХ также становится понятной наблюдаемая в эксперименте зависимость порогового давления от величины приложенного к образцу напряжения — увеличение напряжения уменьшает пороговое давление (см. вставку на рис. 1), при этом отмеченная разность производных $\partial j/\partial P$ возрастает.

На рис. 2 показаны ВАХ деформированных в направлении [111] образцов и результаты измерений степени однородности электрического поля по длине образца, выполненные при помощи емкостных зондов при $T = 77$ К. В этом случае на характеристиках практически отсутствует участок насыщения тока, но, как показывают зондовые измерения (рис. 2, а), в образце и здесь реализуется неоднородное распределение поля по длине образца. Таким образом, увеличение температуры не привело к подавлению ОДП. Так же как и при $T = 4.2$ К, увеличение давления приводит к уменьшению интервала полей, в которых реализуется ОДП.

На рис. 3 приведены типичные зависимости тока и величины сигнала оптического излучения от одноосного давления, приложенного вдоль направления [111], для образцов с разными концентрациями легирующей примеси. Аналогичные зависимости получены и для направления [100]. При $T = 4.2$ К для образцов с удельным сопротивлением 5 и 15 Ом · см резкий рост тока (до 10 раз) с увеличением давления всегда сопровождается резким ростом оптического сигнала на $2 \div 3$ порядка. (Здесь необходимо отметить, что для некоторых образцов независимо от кристаллографических характеристик и концентрации легирующей

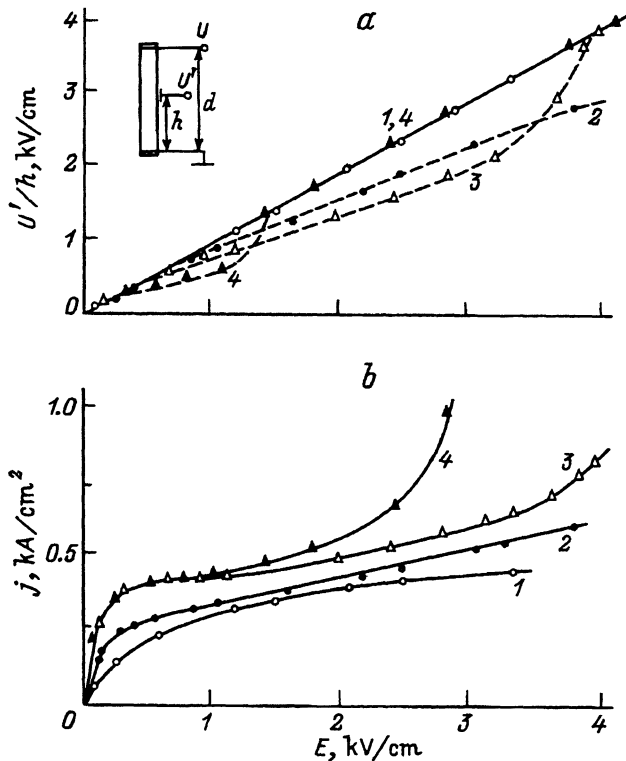


Рис. 2. Зависимость напряжения на зонде U' , отнесенного к расстоянию до анода h , от среднего поля в образце $E = U/d$ (а) и вольт-амперные характеристика образца b при $T = 77$ К. P , кбар: 1 — 0, 2 — 10.5, 3 — 15.8, 4 — 17.5. $E \parallel P \parallel [111]$.

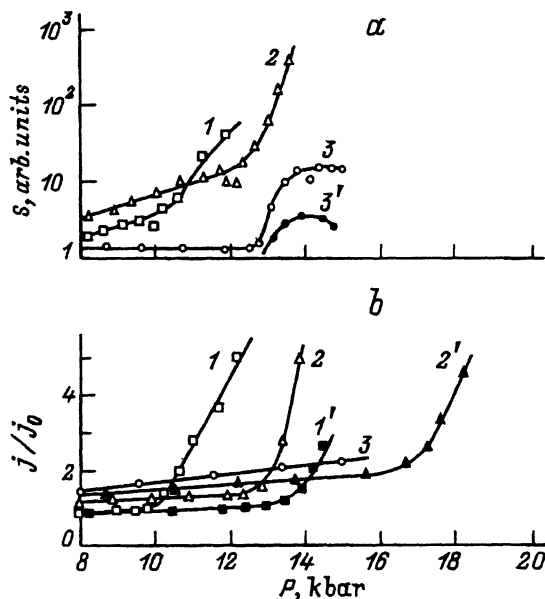


Рис. 3. Зависимости амплитуды оптического сигнала S (а) и относительного изменения тока j/j_0 (б) от одноосного давления для образцов с разной концентрацией примесей. Удельное сопротивление, Ом·см: 1,1' — 5; 2,2' — 15; 3,3' — 45. Температура, К: 1-3,3' — 4.2; 1',2' — 77. Фотоприемники: 1-3,1',2' — Ge(Ga); 3' — Ge(Zn).

примеси оптический сигнал возрастал в гораздо меньшей степени — примерно на порядок при таком же возрастании тока. Возможно, для таких образцов резонатор на полном внутреннем отражении [6] обладал недостаточной добротностью). Отметим, что рост оптического сигнала начинается еще до достижения порогового давления. Для образцов с удельным сопротивлением $45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ резкого роста тока с увеличением деления не наблюдалось. Однако в этом случае имеется пороговое давление, при котором наблюдается резкое увеличение оптического сигнала для фотоприемников обоих типов, Ge(Ga) и Ge(Zn) . При дальнейшем увеличении давления происходит насыщение оптического сигнала. Для коротковолнового фотоприемника можно даже говорить о последующем уменьшении сигнала (кривая $3'$). В случае образцов с удельным сопротивлением 5 и $15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ насыщения оптического сигнала не наблюдалось — сигнал рос с увеличением давления и тока вплоть до разрушения образцов.

При $T = 77 \text{ К}$ оптический сигнал не измерялся, однако можно ожидать, что и здесь резкий рост тока также сопровождается ростом сигнала фотоприемника.

Измерения, проведенные для образцов, вырезанных вдоль различных кристаллографических направлений, не показали явной зависимости пороговых давлений и полей от кристаллографических характеристик образца. Диапазон давлений P (при $E = U/d = 3 \div 4 \text{ кВ/см}$), при которых «возгораются» образцы, одинаков для различных кристаллографических направлений и составляет $8.5 \div 13 \text{ кбар}$ при $T = 4.2 \text{ К}$.

Обсуждение результатов эксперимента

Схематически энергетический спектр дырок в деформированном германии показан на рис. 4 [7]. В электрическом поле $E \parallel P$ энергия дырки в нижней подзоне изменяется вначале согласно закону дисперсии легких дырок ($m_l = 0.046m_0$ для $P \parallel [100]$ и $m_l = 0.04m_0$ для $P \parallel [111]$, m_0 — масса свободного электрона), а после прохождения точки перегиба — по закону дисперсии тяжелых дырок ($m_h = 0.21m_0$ для $P \parallel [100]$ и $m_h = 0.504m_0$ для $P \parallel [111]$). Для верхней подзоны порядок чередования законов дисперсии меняется на обратный. Величина расщепления валентных подзон Δ при $k = 0$ пропорциональна приложенному давлению и может быть представлена в виде $\Delta = \alpha P$, где $\alpha = 6$ и 3.7 мэВ/кбар для одноосной деформации вдоль направлений $[100]$ и $[111]$ соответственно.

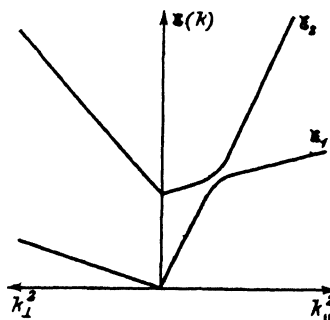


Рис. 4. Схематический вид энергетического спектра дырок в деформированном Ge. $k_{\parallel} \parallel P$, $k_{\perp} \perp P$.

В слабом электрическом поле до 200 В/см, когда кинетическая энергия носителей заряда \mathcal{E} не превышает Δ , дырки обладают высокой подвижностью, и этим объясняется более резкий рост тока как функции приложенного напряжения в деформированных образцах по сравнению со случаем $P = 0$.

При увеличении приложенного к образцу напряжения из-за смены законов дисперсии будет происходить уменьшение подвижности как функции напряженности электрического поля, что приводит к появлению ОДП.

Теоретически возникновение ОДП в деформированном германии было предсказано в работе [3], а экспериментально подтверждено в [8]. В наших экспериментах ОДП проявляется в возникновении в деформированных образцах неоднородного распределения напряженности электрического поля. Как следует из зондовых измерений, резкий рост тока при увеличении давления всегда сопровождается восстановлением однородного распределения поля по длине образца. Следовательно, можно сделать вывод о подавлении ОДП с ростом давления при постоянном приложенном к образцу напряжении. Нетривиальность ситуации заключается в том, что, с одной стороны, одноосное давление создает условия для появления ОДП в дырочном германии, а с другой — приводит в действие механизм, который подавляет ОДП. Резкий рост оптического сигнала в деформированных образцах позволяет предположить, что таким механизмом может быть переброс носителей заряда в верхнюю подзону \mathcal{E}_2 , где их подвижность такая же, как и в нижней части подзоны \mathcal{E}_1 (рис. 4). Такой переброс носителей в верхнюю подзону приведет и к увеличению тока, и к росту оптического сигнала в широком диапазоне энергий фотонов, обусловленному вертикальными переходами между ветвями валентной зоны. Из изложенного ясно, что развитие неоднородного распределения поля в образце, обусловленного ОДП, является отрицательным фактором для развития межподзонного переброса носителей, и поэтому возможное обсуждение механизма такого переброса целесообразно провести после дополнительных исследований, например, прикладывая поле $\mathbf{E} \perp \mathbf{P}$, когда не ожидается (см. рис. 4) появление ОДП.

Выводы

1. Пороговое возрастание ИК излучения горячих дырок наблюдается при всех исследованных концентрациях примесей в образцах.
2. Установлено уменьшение пороговых давлений при увеличении концентрации легирующей примеси.
3. Обнаружено, что при $T = 77$ К пороговое возрастание тока реализуется при значительно больших давлениях, чем при гелиевых температурах.

В заключение выражаем глубокую благодарность М.С. Кагану и В.А. Алтухову за методическую помощь при постановке эксперимента, Л.Е. Воробьеву и О.Г. Сарбею за внимание и поддержку данной работы, а также В.М. Васецкому за предоставленный фотоприемник Ge(Zn).

Работа выполнена по заданию Фондов фундаментальных исследований Украины и России.

- [1] И.В. Алтухов, М.С. Каган, В.Н. Синис. Письма ЖЭТФ, **47**, 136 (1988); И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.Н. Синис, Ф.А. Смирнов. ЖЭТФ, **101**, 756 (1992).
- [2] Е.В. Стариков, П.Н. Шикторов. ФТП, **23**, 1462 (1989).
- [3] В.К. Ridley, Т.В. Watkins. Proc. Phys. Soc., **78**, N 500, 293 (1961).
- [4] В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках (М., 1972).
- [5] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.П. Синис. ЖЭТФ, **103**, 1829 (1993).
- [6] Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках, под ред. А.А. Андропова (Горький, ИПФ АН СССР, 1986).
- [7] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках (М., 1978).
- [8] А.А. Кастальский, С.М. Рывкин. ФТП, **1**, 622 (1967); J.E. Smith, J.C. McGroddy, M.I. Nathan. Phys. Rev., **186**, 727 (1969).

Редактор Л.В. Шаронова

An experimental study of the influence of a uniaxial pressure on the effects of hot holes in *p*-germanium in longitudinal electric fields

V.G. Belykh, A.T. Dalakyan, V.N. Tulupenko, D.A. Firsov

Donbass State Mechanical Engineering Academy,
343916, Kramatorsk, the Ukraine